



BEST AVAILABLE COPY

①9 BUNDESREPUBLIK
DEUTSCHLAND



DEUTSCHES
PATENT- UND
MARKENAMT

⑫ **Offenlegungsschrift**
⑩ **DE 100 63 976 A 1**

⑤1 Int. Cl. 7:
H 01 S 3/081
H 01 S 3/10
H 01 S 3/098
G 02 B 17/00

②1 Aktenzeichen: 100 63 976.3
②2 Anmeldetag: 21. 12. 2000
④3 Offenlegungstag: 4. 7. 2002

DE 100 63 976 A 1

⑦1 Anmelder:
LZH Laserzentrum Hannover e.V., 30419 Hannover,
DE

⑦4 Vertreter:
Leine & Wagner, 30163 Hannover

⑦2 Erfinder:
Fallnich, Carsten, Dr., 31275 Lehrte, DE

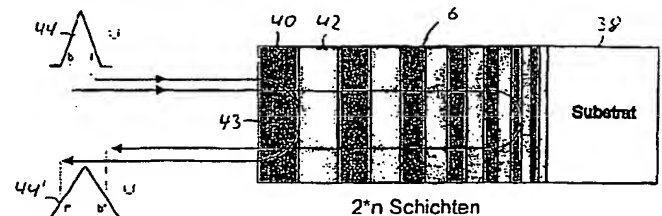
⑤6 Entgegenhaltungen:
DE 199 60 765 A1
DE 197 17 367 A1
WO 99 60 675 A1

Die folgenden Angaben sind den vom Anmelder eingereichten Unterlagen entnommen

Prüfungsantrag gem. § 44 PatG ist gestellt

⑤4 Resonator, regenerativer Verstärker für ultrakurze Laserpulse und mehrschichtiger Spiegel

⑤7 Ein Resonator (4) zur Verstärkung von Laserpulsen, insbesondere von ultrakurzen Laserpulsen, weist wenigstens zwei Spiegel (6, 8, 12) zur Reflexion der Laserpulse, ein zwischen den Spiegeln (6, 8, 12) angeordnetes optisches Verstärkungsmedium zur Verstärkung der Laserpulse und Mittel zur zeitlichen Dehnung der Laserpulse auf. Erfindungsgemäß sind die Mittel zur zeitlichen Dehnung durch wenigstens einen Spiegel gebildet, dessen bzw. deren Gruppengeschwindigkeitsdispersion so gewählt ist, daß eine zur Herabsetzung der Spitzenleistung erforderliche zeitliche Dehnung der Laserpulse erzielt ist. Bei einem erfindungsgemäßen regenerativen Verstärker weist der Spiegel vorzugsweise eine positive Gruppengeschwindigkeitsdispersion auf.



DE 100 63 976 A 1

[0001] Die Erfindung betrifft einen Resonator der im Oberbegriff der Ansprüche 1 und 2 genannten Art, einen regenerativen Verstärker der im Oberbegriff des Anspruchs 13 genannten Art für ultrakurze Laserpulse sowie einen mehrschichtigen Spiegel der im Oberbegriff des Anspruchs 15 genannten Art.

[0002] Ein Resonator der betreffenden Art ist allgemein bekannt. Er dient zur Verstärkung von ultrakurzen Laserpulsen in einem regenerativen Verstärker und weist wenigstens zwei Spiegel zur Reflexion der Laserpulse auf, zwischen denen ein optisches Verstärkungsmedium, insbesondere ein Lasermmedium, zur Verstärkung der Laserpulse angeordnet ist. Bei Betrieb des bekannten Resonators werden von einem Seed-Laser Laserpulse in den Resonator injiziert, zwischen den Spiegeln hin- und herreflektiert und bei ihren Durchläufen durch das Lasermmedium verstärkt. Da die Pulse hierbei eine hohe Verstärkung erfahren, besteht die Gefahr, daß die optischen Bauteile des Resonators bzw. des Verstärkers durch die auftretenden hohen Spitzenleistungen der Laserpulse beschädigt werden. Aus diesem Grunde ist es erforderlich, die ultrakurzen Laserpulse zeitlich zu dehnen, um sicherzustellen, daß die bei der Verstärkung auftretenden Spitzenleistungen die optischen Bauteile des Laser-Resonators und des regenerativen Verstärkers nicht beschädigen. Zu diesem Zweck weist der bekannte Resonator Mittel zur zeitlichen Dehnung der Laserpulse auf, die beispielsweise durch einen außerhalb des Resonators angeordneten Gitter-Stretcher gebildet sind.

[0003] Ein Nachteil eines unter Verwendung des bekannten Laser-Resonators aufgebauten Verstärkers für ultrakurze Laserpulse besteht darin, daß er aufwendig und damit teuer in der Herstellung sowie raumgreifend ist.

[0004] Der Erfindung liegt die Aufgabe zugrunde, einen Laser-Resonator der im Oberbegriff des Anspruchs 1 genannten Art anzugeben, der die Nachteile des bekannten Resonators nicht aufweist, der also den Aufbau eines Verstärkers für ultrakurze Laserpulse ermöglicht, der im Vergleich zu den bekannten Verstärkern einfacher und damit kostengünstiger herstellbar ist und damit kompakter aufgebaut ist. Der Erfindung liegt ferner die Aufgabe zugrunde, einen Verstärker für ultrakurze Laserpulse anzugeben, der einfach und kostengünstig herstellbar sowie kompakt ist.

[0005] Diese Aufgabe wird hinsichtlich des Resonators durch die Lehre der Ansprüche 1 und 2 und hinsichtlich des Verstärkers durch die Lehre des Anspruchs 13 gelöst.

[0006] Der Erfindung liegt die Erkenntnis zugrunde, daß zur Erzielung einer ausreichenden zeitlichen Dehnung der Laserpulse aufwendige optische Bauteile, beispielsweise ein außerhalb des Resonators angeordneter Gitter-Stretcher, nicht erforderlich sind, sondern daß vielmehr auch einfache und kostengünstige optische Bauteile, wie sie in Resonatoren oder Verstärkern ohnehin vorhanden sind, zu diesem Zweck verwendet werden können, sofern deren Gruppengeschwindigkeitsdispersion so gewählt wird, daß eine zur Herabsetzung der Spitzenleistung in dem erforderlichen Maße erforderliche zeitliche Dehnung der Laserpulse durch diese Bauteile erzielt wird. Hierbei ist die Gruppengeschwindigkeitsdispersion (GVD) wie folgt definiert:

$$GVD = \beta_2 = \frac{\lambda^3}{2\pi c^2} \frac{d^2 n}{d\lambda^2}$$

wobei λ die Wellenlänge der verwendeten Laserstrahlung, c die Lichtgeschwindigkeit und $n = n(\lambda)$ der wellenlängenabhängige Brechungsindex ist. Eine $GVD > 0$ wird als normale Dispersion und eine $GVD < 0$ als anomale Dispersion

bezeichnet.

[0007] Nach der Lehre des Anspruchs 1 sind die Mittel zur zeitlichen Dehnung durch wenigstens einen Spiegel gebildet, dessen bzw. deren Gruppengeschwindigkeitsdispersion so gewählt ist, daß eine zur Herabsetzung der Spitzenleistung erforderliche zeitliche Dehnung der Laserpulse erzielt ist.

[0008] Durch gezielte Wahl der Gruppengeschwindigkeitsdispersion des Spiegels, beispielsweise bei einem mehrschichtigen Spiegel durch Wahl des Materiales bzw. der Dicke in Strahlrichtung aufeinanderfolgender Schichten des Spiegels, ist mit einfachen und kostengünstigen Mitteln die erforderliche zeitliche Dehnung der Laserpulse erzielbar.

[0009] Somit sind der erfindungsgemäße Resonator und der erfindungsgemäße Verstärker einfach und damit kostengünstig herstellbar.

[0010] Nach der Lehre des Anspruchs 2 ist die Gruppengeschwindigkeitsdispersion der resonatorinternen optischen Bauteile des Resonators so gewählt, daß eine zur Herabsetzung der Spitzenleistung erforderliche zeitliche Dehnung der Laserpulse ausschließlich durch die optischen Bauteile des Resonators erzielt ist. Somit bilden die resonatorinternen optischen Bauteile die Mittel zur zeitlichen Dehnung, so daß zusätzliche Bauteile nicht erforderlich sind und der Resonator besonders einfach und damit kostengünstig aufgebaut ist.

[0011] Eine außerordentlich vorteilhafte Weiterbildung der Lehre des Anspruchs 1 sieht vor, daß der Spiegel durch einen resonatorinternen Spiegel gebildet ist. Bei dieser Ausführungsform ist zur Erzielung der gewünschten Dehnung der Laserpulse ein separater Spiegel nicht erforderlich, so daß sich ein besonders kompakter Aufbau ergibt.

[0012] Entsprechend den jeweiligen Anforderungen kann jedoch der zu Dehnung der Laserpulse verwendete Spiegel auch durch einen außerhalb des Resonators angeordneten separaten Spiegel gebildet sein, wie dies eine Ausführungsform vorsieht. Es kann auch sowohl resonatorintern als auch resonatorextern wenigstens ein Spiegel vorgesehen sein, der zur Pulsdehnung herangezogen wird.

[0013] Wenn die resonatorinternen optischen Bauteile des Resonators eine positive Gruppengeschwindigkeitsdispersion aufweisen und somit ohnehin eine gewisse zeitliche Dehnung der Laserpulse bewirken, so ist es zur Erzielung einer darüber hinausgehenden zeitlichen Dehnung, die entsprechend den jeweiligen Anforderungen zur Herabsetzung der Spitzenleistung in dem erforderlichen Maße erforderlich sein kann, zweckmäßig, daß der Spiegel eine positive Gruppengeschwindigkeitsdispersion aufweist. Auf diese Weise wird die durch die optischen Bauteile des Resonators eingeführte zeitliche Dehnung der Laserpulse auf das erforderliche Maß verstärkt.

[0014] Wenn demgegenüber die optischen Bauteile des Resonators eine negative Gruppengeschwindigkeitsdispersion aufweisen, beispielsweise bei Verwendung bestimmter Lasermedien als optische Verstärkungsmedien, so ist es zur Erzielung der erforderlichen zeitlichen Dehnung der Laserpulse zweckmäßig, daß der Spiegel eine negative Gruppengeschwindigkeitsdispersion aufweist.

[0015] Um die Gruppengeschwindigkeitsdispersion entsprechend den jeweiligen Anforderungen wählen zu können, ist der Spiegel zweckmäßigerweise als mehrschichtiger Spiegel ausgebildet, wobei die Dicke und/oder das Material aufeinanderfolgender, auf ein Substrat aufgebrachtter Schichten des Spiegels aus dielektrischem Material derart gewählt ist, daß der Spiegel die gewünschte Gruppengeschwindigkeitsdispersion aufweist. Falls der Spiegel eine negative Gruppengeschwindigkeitsdispersion aufweisen

soll, so kann beispielsweise ein "gechirpter" oder "doppelt gechirpter" Spiegel verwendet werden, bei dem die Dicke aufeinanderfolgender, auf ein Substrat aufgebracht Schichten von der freien Seite des Spiegels zum Substrat hin zunimmt. Derartige Spiegel zur Erzielung einer negativen Gruppengeschwindigkeitsdispersion sind beispielsweise durch den Aufsatz "Theory of Double-chirped Mirrors" von Nicolai Matuschek, Franz X. Kärtner, Ursula Keller in IEEE Journal of Selected Topics in Quant. Electron. 4, 197/1998 bekannt. Um eine positive Gruppengeschwindigkeitsdispersion zu erzielen, schlägt die Erfindung erstmals einen gechirpten Spiegel vor, bei dem die Schichtenfolge gegenüber den bekannten gechirpten Spiegeln invertiert ist, bei dem also die Dicke aufeinanderfolgender Schichten von der freien Seite des Spiegels zum Substrat hin abnimmt. Bei einem solchen Spiegel, der nachfolgend auch als invertiert gechirpter bzw. invertiert doppelt gechirpter Spiegel bezeichnet wird, werden die langwelligen Frequenzkomponenten des Laserpulses bevorzugt in den in Strahlrichtung vorderen, von dem Substrat weiter entfernten Schichten des Spiegels reflektiert, da deren größere Schichtdicke an die größere Wellenlänge angepaßt ist. Entsprechend werden die kürzerwelligen Frequenzkomponenten bevorzugt in den näher am Substrat liegenden, dünneren Schichten reflektiert, da erst dort durch die abnehmende Schichtdicke der Schichten für kürzere Wellenlängen die Reflektivität zunimmt. Durch die unterschiedlichen Reflexionsorte der verschiedenen spektralen Anteile der Laserpulse kommt es zu zeitlichen Verzögerungen bzw. Phasenverschiebungen, so daß die Pulsvorderflanke früher und die Pulsrückflanke später reflektiert wird. Hierdurch wird der Puls zeitlich gedehnt und gleichzeitig phasenmoduliert, so daß die Pulsspitzenleistung mit zunehmender Pulsdauer abnimmt.

[0016] Dementsprechend ist es zur Erzielung einer positiven Gruppengeschwindigkeitsdispersion zweckmäßig, daß die Dicke der Schichten des Spiegels von seiner freien Seite zum Substrat hin abnimmt.

[0017] Eine andere außerordentlich vorteilhafte Weiterbildung der erfindungsgemäßen Lehre sieht vor, daß der Resonator Mittel aufweist, die unterschiedliche Spektralanteile der Laserpulse räumlich voneinander trennen. Auf diese Weise läßt sich die Spitzenleistung der Laserpulse weiter verringern, insbesondere in Kombination mit der erfindungsgemäß vorgesehenen zeitlichen Dehnung der Laserpulse. Auf diese Weise ist sichergestellt, daß die Pulsspitzenleistung nicht die Zerstörungsschwelle der optischen Bauteile des Resonators überschreitet. Aufgrund der räumlichen Trennung unterschiedlicher Spektralanteile der Laserstrahlung werden diese Spektralanteile räumlich getrennt verstärkt. Auf diese Weise ist die spektrale Einschnürung (spectral gain narrowing) deutlich verringert, so daß sich auch besonders kurze Pulse verstärken lassen. Ein weiterer Vorteil dieser Ausführungsform besteht darin, daß sich aufgrund der räumlichen Trennung unterschiedlicher Spektralanteile der Laserstrahlung voneinander der zeitliche Pulsverlauf weitergehend kontrollieren läßt.

[0018] Eine Weiterbildung der vorgenannten Ausführungsform sieht vor, daß die Mittel, die unterschiedliche Spektralanteile der Laserpulse räumlich voneinander trennen, wenigstens eine refraktive Optik, beispielsweise ein Prisma, und/oder wenigstens eine diffraktive Optik, beispielsweise ein Beugungsgitter, und/oder wenigstens eine refraktiv-diffraktive Optik, beispielsweise ein sogenanntes GRISM (granting on prism), aufweisen. Derartige Optiken stehen als einfache und kostengünstige Standardbauteile zur Verfügung, so daß der Aufbau des erfindungsgemäßen Resonators bzw. des erfindungsgemäßen Verstärkers einfach und kostengünstig gestaltet ist.

[0019] Zur Kompensation von Phasenfehlern der Resonatorkomponenten kann wenigstens eine Amplitudenmaske und/oder wenigstens eine Phasenmaske vorgesehen sein, die in der Fourier-Ebene angeordnet ist bzw. sind, wie dies eine Weiterbildung vorsieht.

[0020] Das Verstärkungsmedium kann ein Laser-Medium oder ein optisch-parametrisch verstärkendes Medium sein, wie dies Ausführungsformen vorsehen. Insbesondere bei der Ausführungsform mit der räumlichen Trennung unterschiedlicher Spektralanteile der Laserpulse voneinander kann das Verstärkungsmedium beispielsweise durch einen flachen Laserkristall gebildet sein, der sich besonders einfach kühlen läßt. Durch aktive Lasermedien, beispielsweise Nd:YVO-, Yb:Glas- oder Cr:LiCAF-Kristalle, ist eine hohe Verstärkung der Laserpulse erzielbar.

[0021] Eine Weiterbildung des erfindungsgemäßen Verstärkers ist im Anspruch 14 angegeben. Gemäß dieser Weiterbildung ist dem Verstärker wenigstens ein optisch-parametrisch verstärkendes Medium oder ein periodisch gepolter Kristall nachgeordnet. Bei einem periodisch gepolten Kristall, beispielsweise einem Kristall, bei dem invertierte Domänen fächerartig angeordnet sind, ist bei räumlicher Trennung der Spektralanteile der Laserpulse, wie sie bei der Ausführungsform des erfindungsgemäßen Resonators gemäß Anspruch 9 erzielt ist, eine breitbandige Frequenzkonversion der Laserpulse, beispielsweise durch Erzeugung der zweiten Harmonischen, ermöglicht. Darüber hinaus kann der Kristall mit in Strahlrichtung verlaufenden Elektroden versehen sein. Durch Anlegen einer Hochspannung an diese Elektroden ist dann die Phasenlage der verschiedenen, in den Laserpulsen enthaltenen Wellenlängen getrennt voneinander beeinflussbar, so daß eine adaptive Optik gebildet ist. Auf diese Weise ist eine Verstärkung mit hoher Bandbreite und gleichzeitig eine Steuerung der räumlich voneinander getrennten Spektralanteile der Laserpulse, beispielsweise hinsichtlich ihrer Phasenlage, ermöglicht.

[0022] Ein erfindungsgemäßer mehrschichtiger Spiegel mit positiver Gruppengeschwindigkeitsdispersion ist im Anspruch 15 angegeben.

[0023] Zur Erzielung einer positiven Gruppengeschwindigkeitsdispersion ist es hierbei zweckmäßig, wenn die Dicke der Schichten des Spiegels von seiner freien Seite zum Substrat hin abnimmt, wie dies eine Weiterbildung vorsieht.

[0024] Die Erfindung wird nachfolgend anhand der beigegebenen Zeichnung näher erläutert, in der Ausführungsbeispiele dargestellt sind.

[0025] Es zeigt:

[0026] Fig. 1 ein schematisches Blockschaltbild eines ersten Ausführungsbeispiels eines erfindungsgemäßen regenerativen Verstärkers für ultrakurze Laserpulse,

[0027] Fig. 2 in stark schematischer Schnittansicht einen in dem Resonator des Verstärkers gemäß Fig. 1 verwendeten Spiegel,

[0028] Fig. 3 in vergrößerter Darstellung eine Einzelheit im Bereich des Laserkristalls bei dem Ausführungsbeispiel gemäß Fig. 1,

[0029] Fig. 4 in gleicher Darstellung wie Fig. 1 ein zweites Ausführungsbeispiel eines erfindungsgemäßen Verstärkers und

[0030] Fig. 5 eine stark schematische Schnittansicht eines periodisch gepolten Kristalls zur breitbandigen Frequenzkonversion.

[0031] In den Figuren der Zeichnung sind gleiche bzw. sich entsprechende Bauteile mit den gleichen Bezugszeichen versehen.

[0032] In Fig. 1 ist ein Verstärker 2 für ultrakurze Laserpulse dargestellt, der einen Resonator 4 aufweist, der einen

ersten als Endspiegel ausgebildeten Spiegel 6 und einen zweiten als Endspiegel ausgebildeten Spiegel 8 aufweist, zwischen denen ein Lasermedium in Form eines Laserkristalls 10 angeordnet ist. Der Resonator weist ferner einen weiteren Spiegel 12 sowie ein Paar von Prismen 14, 16 auf. [0033] Zum Pumpen des Laserkristalls 10 ist ein Diodenlaser 18 vorgesehen, der über zwei bei diesem Ausführungsbeispiel zur Modenanpassung dienende Linsen 20, 22 Laserlicht in den Laserkristall 10 einstrahlt.

[0034] Zur Auskopplung verstärkter Laserpulse aus dem Resonator 4 sind optische Schaltermittel vorgesehen, die bei diesem Ausführungsbeispiel durch eine Pockelszelle 24 und einen Dünnschichtpolarisator 26 gebildet sind. Die optischen Schaltermittel sind für sich genommen allgemein bekannt und werden daher hier nicht näher erläutert.

[0035] Der Verstärker 2 dient zur Verstärkung ultrakurzer Laserpulse, die von einem Seed-Laser 28 über einen Einkoppelspiegel 30 in den Verstärker 2 eingestrahlt werden. Zur Modenanpassung ist zwischen dem Seed-Laser 28 und dem Spiegel 30 bei diesem Ausführungsbeispiel ein Paar von Linsen 32, 34 vorgesehen.

[0036] Zur Entkopplung des Seed-Strahles von aus dem Resonator 4 ausgekoppelter, verstärkter Laserstrahlung in Form von Laserpulsen ist ein optischer Isolator 36 vorgesehen, der für sich genommen allgemein bekannt ist und daher hier nicht näher erläutert wird.

[0037] Der Resonator 4 weist erfindungsgemäß Mittel auf, die die von dem Seed-Laser 28 in den Resonator 4 injizierten Laserpulse zeitlich dehnen. Diese Mittel sind bei dem Ausführungsbeispiel gemäß Fig. 1 durch die Spiegel 6, 8, 12 gebildet, die als invertiert doppelt gechirpte Spiegel ausgebildet sind. Um eine zeitliche Dehnung der Laserpulse zu erzielen, ist die Dicke aufeinanderfolgender auf ein Substrat aufgebracht Schichten der Spiegel 6, 8, 12 derart gewählt, daß die Spiegel 6, 8, 12 für die Laserstrahlung der verwendeten Wellenlänge eine positive Gruppengeschwindigkeitsdispersion (GVD) aufweisen, die über die spektrale Bandbreite der Laserpulse im wesentlichen konstant ist.

[0038] In Fig. 2 ist schematisch eine Schnittansicht durch den Spiegel 6 dargestellt, der ein Substrat 38 aufweist, auf das mehrere aufeinanderfolgende Schichten aus dielektrischem Material aufgebracht sind, von denen in Fig. 2 lediglich zwei Schichten mit den Bezugszeichen 40, 42 versehen sind. Zur Veranschaulichung ist die Dicke der Schichten 40, 42 überhöht dargestellt. Die Dicke der aufeinanderfolgenden Schichten 40, 42 des Spiegels 6 nimmt von einer freien Seite 43 des Spiegels 6 zum Substrat hin ab, so daß der Spiegel 6 für die Laserstrahlung der verwendeten Wellenlänge eine positive Gruppengeschwindigkeitsdispersion aufweist. Infolgedessen werden die von dem Seed-Laser 28 in den Resonator 4 eingestrahnten Laserpulse bei Reflexion an dem Spiegel 6 zeitlich gedehnt. In Fig. 2 ist links ein Impuls 44 dargestellt, der bei Reflexion an dem Spiegel 6 zeitlich gedehnt wird, wie dies in Fig. 2 bei 44' angedeutet ist. Die Dehnung des Impulses beruht darauf, daß die Spektralanteile größerer Wellenlänge bevorzugt an den in Strahlrichtung vorderen, von dem Substrat 38 weiter entfernten Schichten des Spiegels 6 reflektiert werden, da die Dicke dieser Schichten an die Reflexion der Spektralanteile größerer Wellenlänge angepaßt ist. Demgegenüber werden die Spektralanteile geringerer Wellenlänge bevorzugt an den in Strahlrichtung hinteren, näher an dem Substrat 38 angeordneten dünneren Schichten reflektiert, da die Dicke dieser Schichten an die Reflexion der Spektralanteile geringerer Wellenlänge angepaßt ist. Aufgrund der unterschiedlichen Reflexionsorte unterschiedlicher Spektralanteile wird die Puls Vorderflanke früher und die Pulsrückflanke später reflektiert, so daß der Puls zeitlich gedehnt wird.

[0039] Die Spiegel 8, 12 des Resonators 4 sind in entsprechender Weise als invertiert gechirpte Spiegel mit positiver Gruppengeschwindigkeitsdispersion aufgebaut.

[0040] Bei Betrieb des erfindungsgemäßen regenerativen Verstärkers werden die von dem Seed-Laser 28 in den Resonator 4 eingestrahnten Laserpulse in dem Resonator 4 verstärkt, wobei die Laserpulse bei Reflexion an den eine positive Gruppengeschwindigkeitsdispersion aufweisenden Spiegeln 6, 8, 12 zeitlich gedehnt werden. Durch die zeitliche Dehnung der Laserpulse wird die Pulsspitzenleistung herabgesetzt, so daß eine Beschädigung der Bauteile des Verstärkers 2 vermieden und gleichzeitig eine hohe Verstärkung der Laserpulse ermöglicht ist.

[0041] Das Prismenpaar 14, 16 bewirkt hierbei eine räumliche Trennung unterschiedlicher Spektralanteile der Laserpulse voneinander, wie dies in Fig. 3 angedeutet ist. Aufgrund der räumlichen Trennung unterschiedlicher Spektralanteile ist einerseits die Pulsspitzenleistung der Laserpulse weiter reduziert. Andererseits werden auf diese Weise die unterschiedlichen Spektralanteile der Laserpulse räumlich getrennt verstärkt, so daß die spektrale Einschnürung (spectral gain narrowing) deutlich reduziert ist.

[0042] Dadurch, daß die erforderliche zeitliche Dehnung der Laserpulse durch die ohnehin in dem Resonator 4 vorhandenen Spiegel 6, 8, 12 erzielt wird, sind zusätzliche Mittel zur zeitlichen Dehnung der Pulse nicht erforderlich, so daß der Verstärker 2 einfach im Aufbau und damit kostengünstig sowie kompakt ist. Er ermöglicht darüber hinaus eine hohe Verstärkung der Laserpulse.

[0043] In Fig. 4 ist ein zweites Ausführungsbeispiel eines erfindungsgemäßen regenerativen Verstärkers 2 für ultrakurze Laserpulse dargestellt, das sich von dem Ausführungsbeispiel gemäß Fig. 1 dadurch unterscheidet, daß die Pockelszelle 24 zwischen dem Laserkristall 10 und dem Prisma 16 angeordnet ist und daß der Dünnschichtpolarisator 26 nicht als separates Bauteil ausgebildet, sondern auf das Prisma 16 aufgedampft ist.

[0044] In Fig. 5 ist stark schematisiert eine Schnittansicht eines Kristalls 46 dargestellt, der in dem Fachmann allgemein bekannter Weise invertierte Domänen aufweist, von denen in Fig. 5 lediglich eine Domäne mit dem Bezugszeichen 48 versehen ist. Die Domänen 48 verlaufen im wesentlichen quer zur Strahlrichtung der Laserpulse und sind fächerartig angeordnet. Der Kristall 46 ist bei Betrieb einem erfindungsgemäßen Verstärker, beispielsweise dem Verstärker 2 gemäß Fig. 1, nachgeordnet, an dessen Ausgang die unterschiedlichen Spektralanteile der Laserpulse räumlich getrennt voneinander vorliegen. Diese unterschiedlichen Spektralanteile treten somit räumlich voneinander getrennt in den Kristall 46 ein, wie dies in Fig. 5 für drei Wellenlängen WL_1, WL_2 und WL_3 angedeutet ist. Mittels des Kristalls 46 ist eine breitbandige Frequenzkonversion der Laserpulse, beispielsweise durch Erzeugung der zweiten Harmonischen bzw. durch optisch-parametrische Verstärkung, ermöglicht. Darüber hinaus kann der Kristall 46 mit in Strahlrichtung verlaufenden in der Zeichnung nicht dargestellten Elektroden versehen sein. Durch Anlegen einer Hochspannung an diese Elektroden ist dann die Phasenlage der verschiedenen, in den Laserpulsen enthaltenen Wellenlängen getrennt voneinander beeinflussbar, so daß eine adaptive Optik gebildet ist. Auf diese Weise ist eine Verstärkung mit hoher Bandbreite und gleichzeitig eine Steuerung der räumlich voneinander getrennten Spektralanteile der Laserpulse, beispielsweise hinsichtlich ihrer Phasenlage, ermöglicht. Die Art und Weise, wie die Elektroden an dem Kristall 46 angebracht sind, ist dem Fachmann allgemein bekannt und wird daher hier nicht näher erläutert.

Patentansprüche

1. Resonator zur Verstärkung von Laserpulsen, insbesondere von ultrakurzen Laserpulsen, mit wenigstens zwei Spiegeln zur Reflexion der Laserpulse, mit einem zwischen den Spiegeln angeordneten optischen Verstärkungsmedium zur Verstärkung der Laserpulse und mit Mitteln zur zeitlichen Dehnung der Laserpulse **dadurch gekennzeichnet**, daß die Mittel zur zeitlichen Dehnung durch wenigstens einen Spiegel (6, 8, 12) gebildet sind, dessen bzw. deren Gruppengeschwindigkeitsdispersion so gewählt ist, daß eine zur Herabsetzung der Spitzenleistung erforderliche zeitliche Dehnung der Laserpulse erzielt ist. 5
2. Resonator zur Verstärkung von Laserpulsen, insbesondere von ultrakurzen Laserpulsen, mit wenigstens zwei Spiegeln zur Reflexion der Laserpulse, mit einem zwischen den Spiegeln angeordneten optischen Verstärkungsmedium zur Verstärkung der Laserpulse und mit Mittel zur zeitlichen Dehnung der Laserpulse, **dadurch gekennzeichnet**, die Gruppengeschwindigkeitsdispersion der resonatorinternen optischen Bauteile des Resonators (4) so gewählt ist, daß eine zur Herabsetzung der Spitzenleistung erforderliche zeitliche Dehnung der Laserpulse erzielt ist, derart, daß die Mittel zur zeitlichen Dehnung der Laserpulse durch die resonatorinternen optischen Bauteile des Resonators (4) gebildet sind. 10
3. Resonator nach Anspruch 1, **dadurch gekennzeichnet**, der Spiegel bzw. die Spiegel zur zeitlichen Dehnung der Laserpulse durch einen resonatorinternen Spiegel bzw. resonatorinterne Spiegel (6, 8, 12) gebildet ist bzw. sind. 15
4. Resonator nach Anspruch 1, **dadurch gekennzeichnet**, daß der Spiegel zur zeitlichen Dehnung der Laserpulse durch einen außerhalb des Resonators angeordneten separaten Spiegel gebildet ist. 20
5. Resonator nach Anspruch 1, **dadurch gekennzeichnet**, daß der Spiegel (6, 8, 12) eine positive Gruppengeschwindigkeitsdispersion (GVD) aufweist. 25
6. Resonator nach Anspruch 1, **dadurch gekennzeichnet**, daß der Spiegel eine negative Gruppengeschwindigkeitsdispersion (GVD) aufweist. 30
7. Resonator nach Anspruch 3, **dadurch gekennzeichnet**, daß wenigstens einer der Spiegel (6, 8, 12) als mehrschichtiger Spiegel ausgebildet ist, wobei die Dicke und/oder das Material aufeinanderfolgender, auf ein Substrat (38) aufgebrachter Schichten (40, 42) des Spiegels (6, 8, 12) derart gewählt ist, daß der Spiegel (6, 8, 12) eine positive Gruppengeschwindigkeitsdispersion aufweist. 35
8. Resonator nach Anspruch 7, **dadurch gekennzeichnet**, daß die Dicke der Schichten (40, 42) des Spiegels von seiner freien Seite (43) zum Substrat (38) hin abnimmt. 40
9. Resonator nach Anspruch 1, **dadurch gekennzeichnet**, daß der Resonator (4) Mittel aufweist, die unterschiedliche Spektralanteile der Laserpulse räumlich voneinander trennen. 45
10. Resonator nach Anspruch 5, **dadurch gekennzeichnet**, daß die Mittel, die unterschiedliche Spektralanteile der Laserpulse räumlich voneinander trennen, wenigstens eine refraktive Optik, beispielsweise ein Prisma

- (14, 16), und/oder wenigstens eine diffraktive Optik, beispielsweise ein Beugungsgitter, und/oder wenigstens eine refraktiv-diffraktive Optik, beispielsweise ein sogenanntes GRISM (grating on prism), aufweisen
11. Resonator nach Anspruch 9, **dadurch gekennzeichnet**, daß wenigstens eine Amplitudenmaske und/oder wenigstens eine Phasenmaske vorgesehen, die in der Fourierebene angeordnet ist bzw. sind.
12. Resonator nach Anspruch 1, **dadurch gekennzeichnet**, daß das Verstärkungsmedium ein Laser-Medium (10) oder ein optisch-parametrisch verstärkendes Medium ist.
13. Regenerativer Verstärker für ultrakurze Laserpulse, **dadurch gekennzeichnet**, daß er einen Resonator (4) nach einem der vorhergehenden Ansprüche aufweist.
14. Verstärker nach Anspruch 13, **dadurch gekennzeichnet**, daß dem Verstärker (2) wenigstens ein optisch-parametrisch verstärkendes Medium oder ein periodisch gepolter Kristall (46) nachgeordnet ist.
15. Mehrschichtiger Spiegel zur Reflexion von Laserpulsen, insbesondere zur Verwendung in einem Laser-Resonator nach einem der vorhergehenden Ansprüche und/oder einem Verstärker nach einem der vorhergehenden Ansprüche, mit mehreren, auf ein Substrat aufgebrachten Schichten aus dielektrischem Material, **dadurch gekennzeichnet**, daß die Dicke und/oder das Material aufeinanderfolgender Schichten (40, 42) derart gewählt ist, daß der Spiegel eine positive Gruppengeschwindigkeitsdispersion (GVD) aufweist.
16. Spiegel nach Anspruch 15, **dadurch gekennzeichnet**, daß die Dicke aufeinanderfolgender Schichten (40, 42) des Spiegels (6) von seiner freien Seite (43) zum Substrat (38) hin abnimmt.

Hierzu 5 Seite(n) Zeichnungen

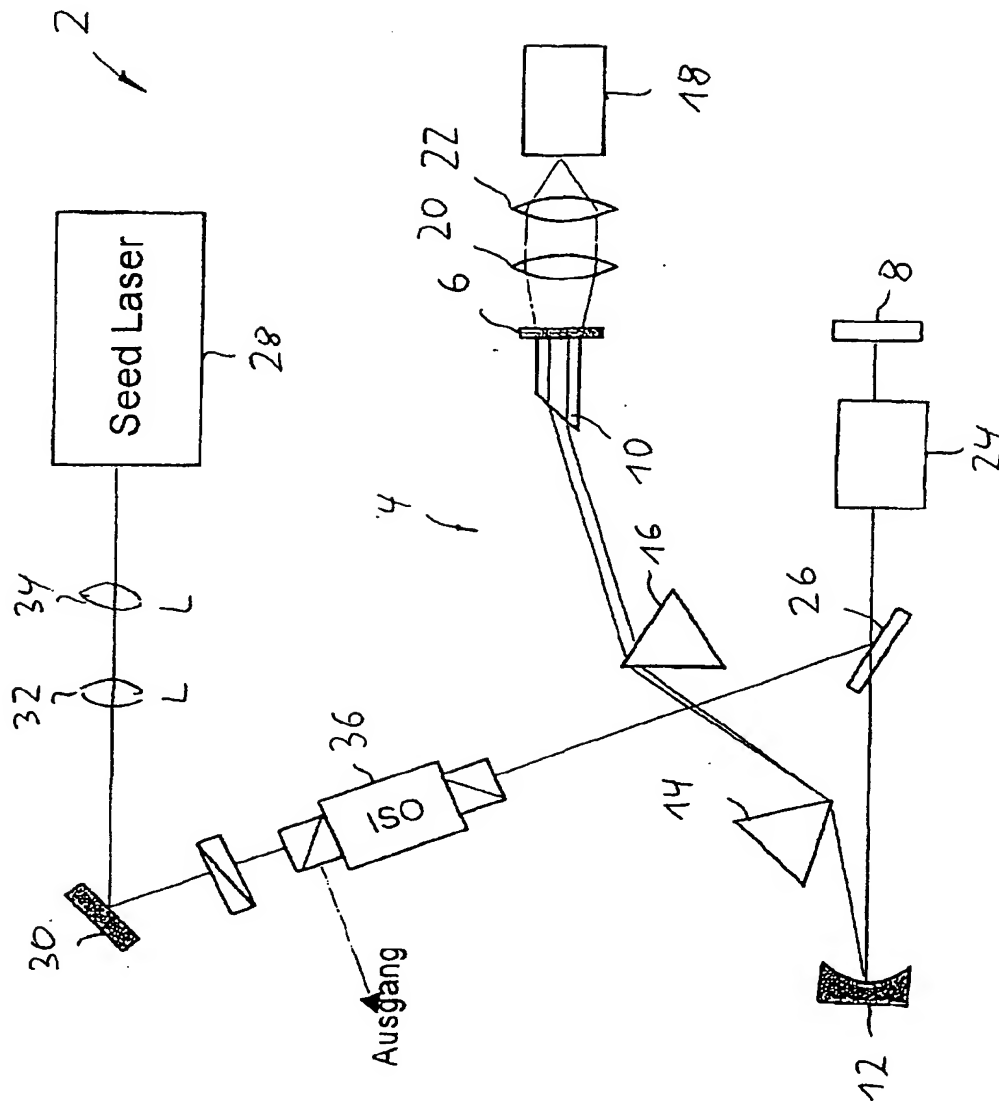


FIG. 1

BEST AVAILABLE COPY

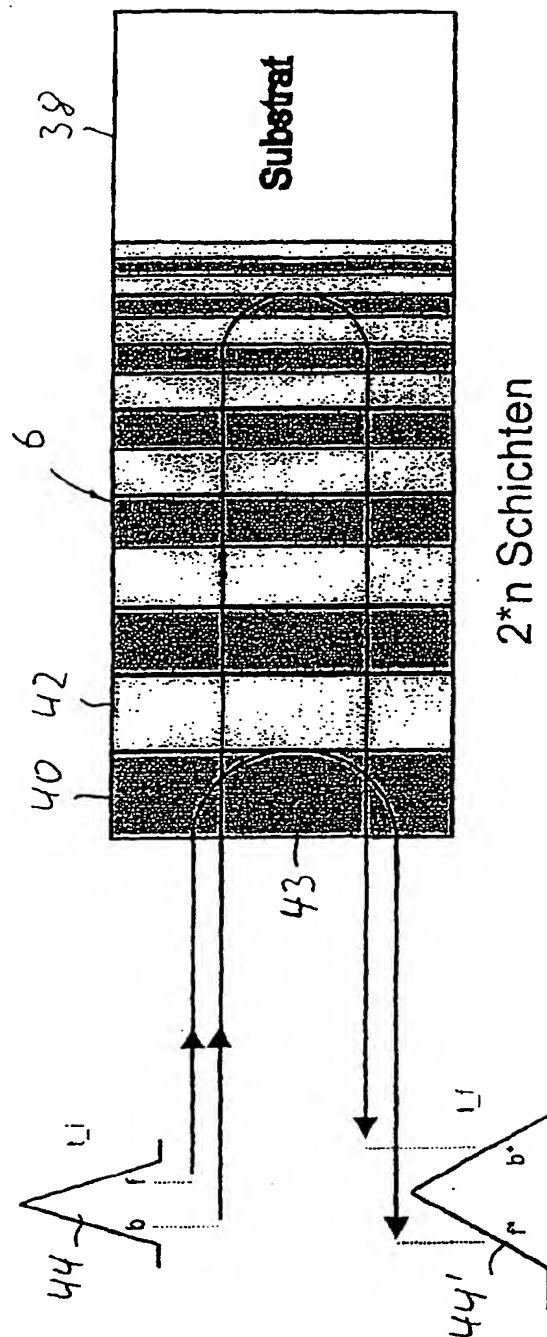


FIG. 2

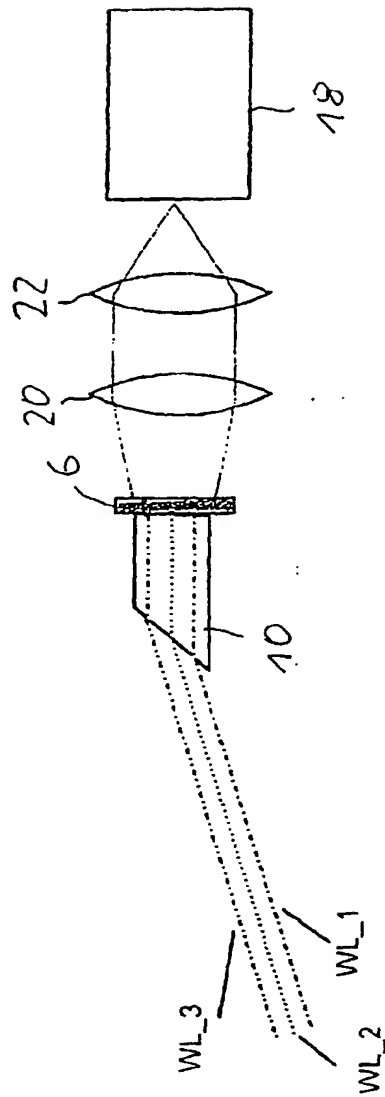


FIG. 3

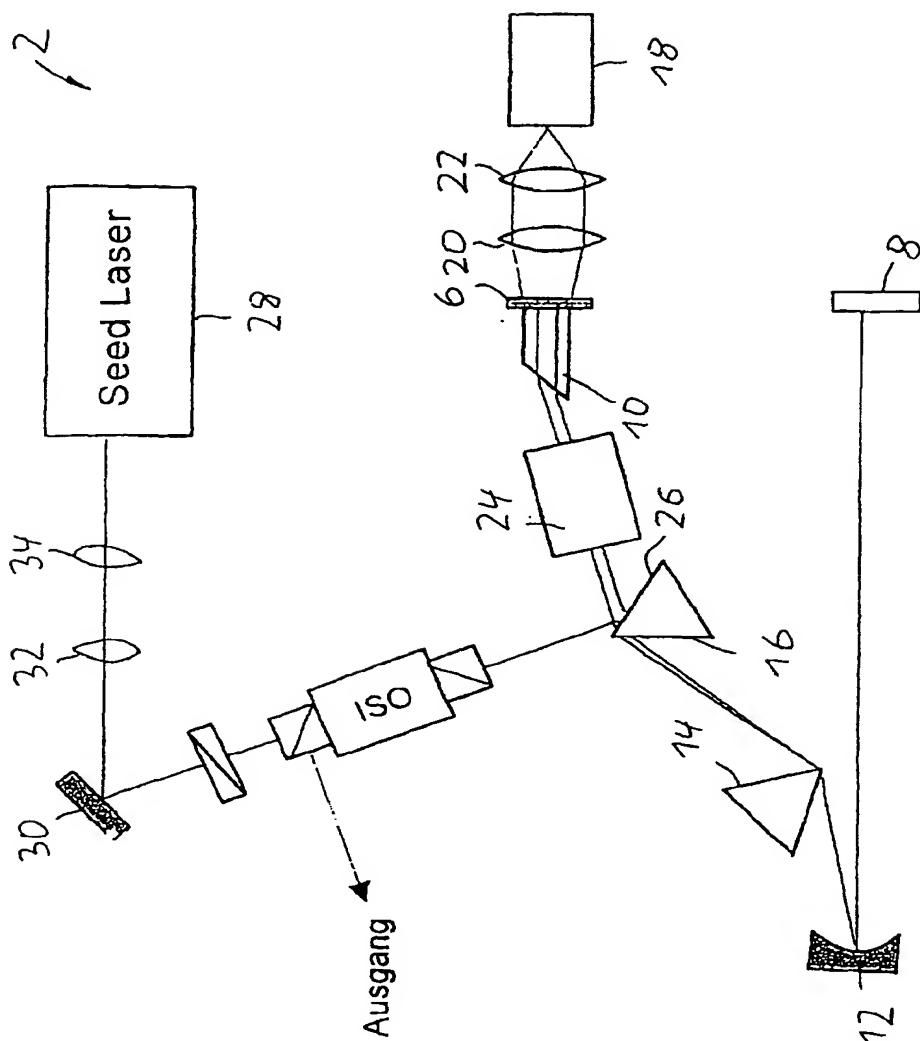


FIG. 4

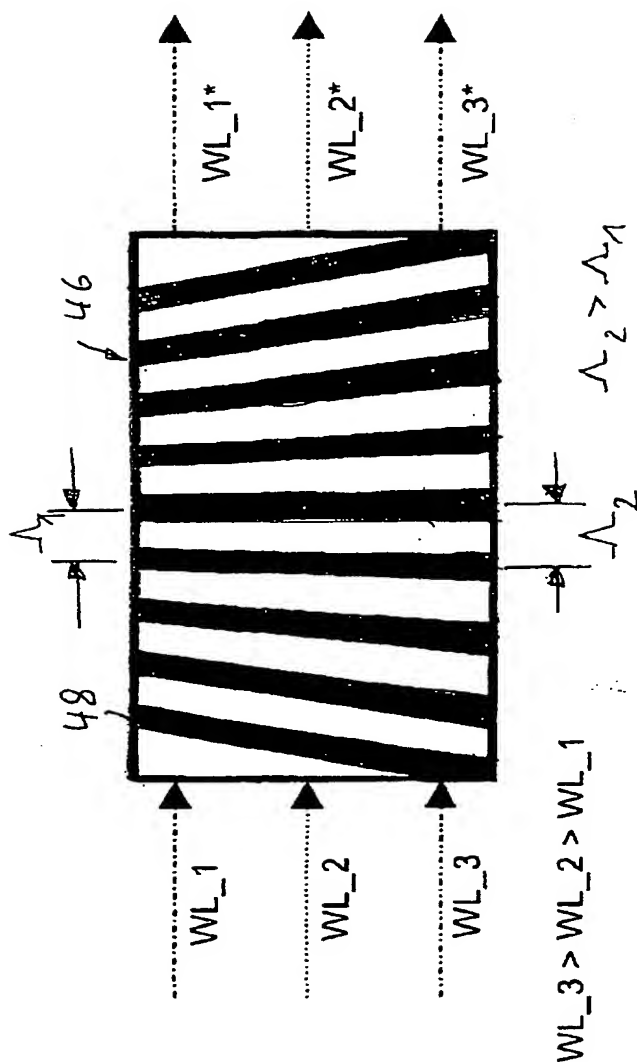


FIG.5